aci avances en ciencias e ingenierías

Artículo/Article
Sección C/Section C
Vol. 14, nro. 1
ID: 2489

Generación de maíces especializados para mejorar la salud y nutrición en México

Ricardo Ernesto Preciado-Ortiz[1]*, María Gricelda Vázquez-Carrillo[2]

[1]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Programa de Maíz región del Bajío. Celaya, Guanajuato. México.
[2]INIFAP, Laboratorio Nacional de Calidad de Maíz. Coatlinchan, Texcoco, México.
*Autor para correspondencia / Corresponding Author, e-mail: repreciado@yahoo.com

Specialty maize generation to improve health and nutrition in Mexico

Abstract

Due to the great maize genetic diversity, over the time selection have been practiced to obtain textures, flavors, aromas for specific uses. At present, this selection is still valid by farmers and also by researchers who take advantage of new technological advances to efficiently assist selection, and to identify maize with specific characteristics, so it is possible "to tailored" bio-fortified, specialty and quality maize varieties according to the main forms of uses, consumption, and exploitation, that provide greater value added, and that allow the development of bio-active compounds and functional foods. Likewise, for the selection of maize with greater digestibility that impact and make more efficient livestock production. The interdisciplinary interaction between maize breeding programs with researcher groups specialized in disciplines related to food technology, can generate bio-fortified specialty maize which contain bio-active and nutraceutical compounds. INIFAP's maize program at Bajío region in Mexico, has implemented strategies to generate improved bio-fortified, bio-active and functional maize varieties, which have an impact on the health and nutrition of consumers. With a view to influencing the strategies described above, emphasis has been placed on maize germplasm development, focused on implementing research lines to generate: high oil content maize; white kernel maize with nixtamalera-tortillera quality; yellow kernel maize; high-quality protein maize (QPM); pigmented (such blue maize); popcorn; forage quality; fusarium and Aflatoxin contamination resistance; among others. This paper presents the advances and achievements obtained in these research lines. Based on the presented information, it is possible to say that we are at the forefront of great challenges and opportunities in interdisciplinary maize research in Latin America. That will allow us to develop genetic materials that, in addition to face imminent production risks, we can select specialty bio-fortified maize varieties, with value added, which allow the development of bio-active components, functional foods and also development of new industrial products.

Keywords: bio-fortified maize, functional foods, bio-active components, added value, maize breeding.

OPEN ACCESS

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Editado por / Edited by: Gabriela Alban

Recibido / Received: 16/11/2021

Aceptado / Accepted: 29/12/2021

Publicado en línea / Published online: 16/05/2022

 DOI: https://dx.doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489

Resumen

Gracias a la gran diversidad genética de maíz existente, a través del tiempo se ha practicado selección hacia maíces con texturas, sabores, aromas y usos específicos. En la actualidad, esta selección sigue siendo vigente tanto por los productores, como por los investigadores quienes aprovechan los avances tecnológicos para asistir la selección de manera eficiente, e identificar maíces con características específicas, por lo que es posible "confeccionar" maíces bio-fortificados, especializados y con calidad de acuerdo a las principales formas de consumo, utilización y aprovechamiento; que aporten mayor valor agregado y que permitan desarrollar componentes bio-activos y alimentos funcionales. Así mismo, para la selección de maíces con mayor digestibilidad que impacten y hagan más eficiente la producción pecuaria. La interacción interdisciplinaria de los programas de mejoramiento genético de maíz con grupos de investigación especialistas en disciplinas relacionadas con la tecnología de alimentos, pueden generar maíces especializados y bio-fortificados que contengan compuestos bio-activos y nutracéuticos. El programa de maíz del INIFAP, en la región del Bajío, en México, ha implementado diversas estrategias para generar maíces mejorados biofortificados, bio-activos y funcionales que tengan un impacto en la salud y nutrición de los consumidores. Para lograr incidir en las estrategias descritas anteriormente, se ha enfatizado en el desarrollo de germoplasma de maíz que permita implementar líneas de investigación enfocadas a: generar maíces de grano blanco y de grano amarillo con alto contenido de aceite; con calidad nixtamalero-tortillera; con alta calidad de proteína (QPM); pigmentados; palomeros (pop corn); calidad pozolera; calidad para elote; de calidad forrajera; resistentes a fusarium y a la contaminación con Aflatoxinas; entre otras. En el presente manuscrito se presentan los avances y logros obtenidos en estas líneas de investigación. Con base en la información presentada es posible decir que estamos al frente de grandes retos y oportunidades en la investigación interdisciplinaria de maíz en Latinoamérica. Que nos permitirá desarrollar materiales genéticos que además de buscar hacer frente a riegos inminentes de producción, podamos seleccionar maíces diferenciados, bio-fortificados, que aporten mayor valor agregado y que permitan desarrollar componentes bio-activos, alimentos funcionales y desarrollo de nuevos productos.

Palabras clave: Maíces bio-fortificados, alimentos funcionales, componentes bio-activos, valor agregado, mejoramiento genético.

INTRODUCCIÓN

En México la importancia del maíz está determinada por diversos factores como son: alimentario, cultural, social, económico, ecológico, científico, de salud pública, productivo, pecuario, industrial, etc.; el consumo *per cápita* de maíz en México es de 336 kg año^{-1}; la superficie cultivada es de alrededor de 7.5 millones de hectáreas con un rendimiento medio de 3.83 ton ha^{-1}, de las cuales 5.9 millones de hectáreas se siembran bajo condiciones de temporal (secano), con un rendimiento medio de 2.47 ton ha^{-1} y 1.6 millones de hectáreas bajo riego, con un rendimiento medio de 8.73 ton ha^{-1}, [1]. Los datos anteriores implican una amplia gama de sistemas de producción que van desde la agricultura empresarial, altamente tecnificada, donde se utilizan semillas mejoradas, riego e insumos sin restricción. De manera opuesta, se encuentra la agricultura de

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489

subsistencia, donde se utilizan las semillas nativas, una insipiente aplicación de insumos, así como una errática precipitación pluvial. En México son producidos alrededor de 28 millones de toneladas de maíz, de los cuales casi el 90% es maíz de grano blanco, y el resto de grano amarillo y usos especiales. Sin embargo, la demanda de maíz en México es superior a su producción, por lo que cada año el país importa más de 16 millones de toneladas de maíz de grano amarillo que se utilizan principalmente en las industrias agropecuaria y de transformación [1].

Existen evidencias antropológicas de que la domesticación del maíz se inició en Mesoamérica hace más de 9 000 años [2]; por lo que, a través de los siglos, se ha practicado selección en los maíces nativos hacia características particulares que provienen de los gustos y criterios que cada productor ha tenido en cuanto a forma y tamaño de mazorca, número de hileras, color y tipo de grano, grueso del elote, precocidad y diversos usos apreciados por sus propiedades de calidad culinaria, como una buena nixtamalización, extensibilidad de la masa, dureza o suavidad de la tortilla, aroma, sabor, tiempo de cocción, perfil de aminoácidos y proteínas, entre muchas otras [3]. En la actualidad, esta selección sigue siendo vigente por los productores e investigadores quienes aprovechan los avances tecnológicos que permiten asistir la selección de manera eficiente para identificar maíces con características específicas.

Gracias a la gran diversidad genética de maíz en Latinoamérica y, de manera específica, en México, se tiene la oportunidad de enfocar el mejoramiento genético con la interacción de especialistas en otras disciplinas relacionadas con la tecnología de alimentos para confeccionar maíces bio-fortificados y especializados que aporten mayor valor agregado y que permitan desarrollar componentes bio-activos y alimentos funcionales de acuerdo a las principales formas de consumo, utilización y aprovechamiento a través de una gran variedad de procesos tradicionales como la nixtamalización, fermentación, cocimiento, tostado, entre otros. Asimismo, con la incorporación de procesos tecnológicos modernos dentro de los programas de mejoramiento, para seleccionar maíces que puedan ser utilizados por la industria para la extracción de diversos derivados de maíz como almidones, edulcorantes, fármacos, alcoholes, biopolímeros, combustibles, entre otros; no menos importante también, es la utilización del maíz como base de la alimentación pecuaria, donde a través de la selección se han identificado maíces con mayor digestibilidad que impactan en la alimentación animal y hacen más eficiente la producción pecuaria.

En la actualidad, en diversas instituciones de México se han fortalecido y consolidado grupos de investigación en tecnología de alimentos, que buscan impactar la salud y alimentación de la población mundial, a través de la generación de nuevo conocimiento científico y tecnológico. La interacción interdisciplinaria de los programas de mejoramiento genético de maíz con estos grupos de investigación, puede potenciar este impacto, al generar maíces especializados que contengan compuestos bio-activos, bio-fortificados y nutracéuticos. Los compuestos nutracéuticos presentes en el maíz no son necesariamente nutrientes, que tradicionalmente han sido asociados con diferencias en la dieta, sino compuestos cuyo consumo ayuda a prevenir e inclusive tratar enfermedades crónico degenerativas [4].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489

El programa de maíz del INIFAP, en la región del Bajío en México, ha implementado diversas estrategias que están enfocadas a incrementar la producción y productividad del maíz, buscar un valor agregado, un impacto favorable en la salud de los consumidores, e incidir en la eficiencia del sector pecuario y agroindustrial. Estas estrategias se enfocan en:

a. Generar maíces mejorados que incrementen la producción y reduzcan costos de cultivo para incrementar la rentabilidad del cultivo en diversas regiones productoras de maíz en México.

b. Seleccionar maíces bio-fortificados, bio-activos y funcionales con mayor valor agregado, que beneficien la salud y nutrición de los consumidores, así como un impacto satisfactorio en los sectores pecuario y agroindustrial.

c. Desarrollar fuentes de germoplasma que contribuyan a reducir riesgos de factores bióticos y abióticos causados por el cambio climático.

Para lograr incidir en las estrategias descritas anteriormente, se ha enfatizado en el desarrollo de germoplasma de maíz que permita implementar las líneas de investigación descritas a continuación:

GENERACIÓN DE MAÍCES CON ALTO CONTENIDO DE ACEITE

El programa de Maíz del INIFAP del Bajío en conjunto con el Programa del Noroeste de México desarrolló cuatro poblaciones de maíz de alto contenido de aceite (dos de grano amarillo y dos de grano blanco), las cuales, a través de 14 ciclos de selección recurrente asistida a través de espectrofotometría de rayos infrarrojos cercanos (NIRS), incrementaron al doble del contenido de aceite de las poblaciones originales [5, 6]. Con el objetivo de iniciar un programa de hibridación, que permitiera el aprovechamiento del germoplasma desarrollado, a partir de las cuatro poblaciones con alto contenido de aceite, fueron derivadas Líneas Doble Haploides (LDH), cuya evaluación *per se* y a través de mestizos [7], así como por cruzamientos dialélicos [8, 9], permitieron identificar LDH agronómicamente superiores, con mejor respuesta heterótica y con mayor adaptación. Con las combinaciones superiores de dichas líneas, en el año 2018, se liberaron, registraron y se obtuvo el título de obtentor de tres nuevos híbridos de alto contenido de aceite: el H-388 O [10] y el H-389 O [11] de grano blanco y el H-327 AO [12] de grano amarillo, todos ellos adaptados a regiones subtropicales de México y que constituyen una alternativa para impactar en la alimentación humana y pecuaria [13], así como en procesos agroindustriales. De manera paralela se estudió el perfil de ácidos grasos en grano [5, 14], así como las propiedades de los ácidos grasos y características del almidón durante el proceso de nixtamalización y elaboración de tortillas [15]. Por otro lado, con este germoplasma en una botana (*snack*) combinada con frijol, se identificaron compuestos bio-activos (fenólicos y oligosacáridos) con actividad antioxidante que pueden prevenir el cáncer [16]. Actualmente, se sigue generando información enfocada hacia las propiedades funcionales y compuestos fitoquímicos, como tocoferoles y fitoesteroles entre otros.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489

MAÍCES DE GRANO BLANCO CON CALIDAD NIXTAMALERO-TORTILLERA

En México, el maíz constituye la base de la alimentación de los mexicanos, a través de productos derivados de la nixtamalización como la tortilla y otros platillos tradicionales, en donde los maíces de grano blanco juegan un papel preponderante. Por lo que, los maíces de grano blanco con calidad nixtamalero-tortillera constituyen una de las principales líneas de investigación del Programa de Maíz del INIFAP.

El proceso de nixtamalización se caracteriza por la hidrólisis que sufre el pericarpio del grano, durante el cocimiento alcalino, cuyo efecto, primeramente, en la solubilización del pericarpio por la acción del óxido de calcio, y que junto con el agua se introducen al interior del grano de maíz, iniciándose así el proceso de hinchamiento e hidratación de los gránulos de almidón contenidos en el endospermo del grano [17].

Esta línea de investigación se enfoca en la generación de maíces de alto potencial de rendimiento de grano blanco. Con el apoyo del Laboratorio Nacional de Calidad de Maíz del INIFAP, se busca que los maíces superiores presenten características de calidad, como son rendimiento de masa y tortilla, buenas características texturales y nutricionales, vida de anaquel, etc. [18, 19]. Algunos híbridos de grano blanco que han sido liberados y registrados en el programa de Maíz del INIFAP adaptados a diversos sistemas de producción de regiones subtropicales son: el H-316 y el H-317 [20]. Actualmente, se encuentran en proceso de caracterización morfológica y de calidad, una nueva generación de híbridos experimentales de grano blanco superiores de mayor potencial de rendimiento, que requieren de su evaluación extensiva para poder llegar a liberar y registrar nuevos híbridos de grano blanco adecuados para la industria de la masa y la tortilla en el país.

MAÍCES DE GRANO AMARILLO

Debido a que en México existe una demanda por parte de la industria agropecuaria de maíces de grano amarillo, es necesario recurrir a la importación de más de 16 millones de toneladas anuales [1]. Con el fin de contribuir a reducir las importaciones de grano amarillo en el país, en el Programa de Maíz del INIFAP, se está trabajando en el desarrollo de germoplasma a través del método genealógico, para la formación de híbridos agronómicamente competitivos con texturas específicas que demandan los diferentes tipos de industrias que van desde cristalinos duros (tipo Flint) a dentados más suaves, y de color de grano más intenso a amarillo claro. En esta línea de investigación también se ha interaccionado con el CIMMYT en un proyecto para la generación de maíces bio-fortificados ricos en pro-vitamina A y beta-carotenos [21]. En el año 2018, el programa de Maíz del INIFAP del Bajío, a partir de nuevas combinaciones de líneas recicladas obtenidas por el método genealógico, liberó y registró el nuevo híbrido H-387A [22], con un rendimiento competitivo, un amplio rango de adaptación, color amarillo intenso, textura semicristalina y un buen contenido de carotenoides totales.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489

MAÍCES DE ALTA CALIDAD DE PROTEÍNA (QPM)

Como una alternativa para mitigar los problemas de desnutrición que existen en muchas regiones de México, los maíces de alta calidad de proteína (QPM por sus siglas en inglés) por su mayor contenido de lisina y triptófano, pueden contribuir en el mejoramiento de las dietas en los sectores más pobres del país. En esta línea de investigación, se ha generado información del potencial productivo y adaptación de híbridos de maíz QPM a través de diferentes mega-ambientes en México [23]; del potencial productivo, propiedades físicas y valor nutricional en híbridos QPM, [24, 25], del proceso de nixtamalización y propiedades de la tortilla en maíces QPM [26]; entre muchas otras. Recientemente, se ha iniciado el estudio de la capacidad antioxidante de péptidos derivados de maíces QPM como componentes anticancerígenos [27 y 28], así como la elaboración de botanas alimenticias combinando maíz de QPM con frijol tépari [29].

El programa de Maíz del INIFAP del Bajío, en 2018, a través de la utilización de líneas de QPM de segunda generación, liberó y registró el nuevo híbrido H-390 C, con rendimiento competitivo y con amplio rango de adaptación.

Los elotes (green corn) son un vegetal fresco, con gran demanda en el mercado nacional. En la mayoría de los países los elotes consumidos, corresponden a la especie *Zea mays var. Saccharata* conocido como *sweet corn*. En México se consume preferentemente *Zea mays L*. de endospermo normal y deficiente en los aminoácidos esenciales lisina y triptófano, por lo que los elotes de maíces QPM se presentan como una opción más nutritiva, toda vez que se ha demostrado, su buena calidad comercial como son: mayor tamaño del elote y llenado completo de granos, así como su superior calidad composicional y nutricional por su mayor contenido de glucosa, fructosa, sacarosa y triptófano respecto a un testigo comercial. Además de identificar la mejor fecha de cosecha, se encontró que los elotes almacenados hasta por 20 días a 4°C, mantuvieron su alto contenido de triptófano, así como los atributos sensoriales que se demandan en el mercado [30]. Por lo que los elotes de maíces QPM, constituyen una buena alternativa para mejorar la nutrición de los sectores más desprotegidos.

MAÍCES PIGMENTADOS

Los maíces pigmentados han sido utilizados desde tiempos ancestrales en la elaboración de alimentos tradicionales, así como en actividades ceremoniales en diversas culturas mesoamericanas [4]. Las antocianinas y compuestos fenólicos, que determinan el color (azul o rojo) del grano de maíz, inciden en la actividad antioxidante que contrarresta a los radicales libres responsables de causar la oxidación de membranas y daño al ADN desencadenando el cáncer, problemas cardiovasculares, fibrosis y envejecimiento [4].

El Programa de Maíz del INIFAP en el Bajío, inició una línea de investigación enfocada al desarrollo y generación de híbridos de maíz pigmentado con mayor potencial de rendimiento, y mejores características agronómicas, debido a que las variedades pigmentadas utilizados actualmente por los productores, son maíces nativos o criollos,

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489

los cuales en su mayoría, presentan desventajas agronómicas, como son: bajo potencial de rendimiento; excesiva altura de planta y tallos débiles, que los hace susceptibles al acame; baja respuesta a la utilización de insumos, que limita la posibilidad de obtener mayores rendimientos mediante un manejo agronómico intensivo en regiones de alto potencial productivo.

En esta línea de investigación, se ha desarrollado un conjunto de líneas endogámicas de maíz pigmentado con las que fueron formados una serie de híbridos de ciclo intermedio-precoz con grano de color negro o rojo, con alto potencial de rendimiento para ser utilizados como una alternativa de valor agregado para la producción de maíz en regiones subtropicales, algunos de estos híbridos se les determinó su perfil fitoquímico y nutracéutico [31]. Actualmente, se está conjuntando la información necesaria para liberar, registrar y obtener el título de obtentor de dos nuevos híbridos trilineales, de maíz pigmentado de color de grano azul y granate, adaptados a regiones subtropicales.

Por otro lado, se está trabajando con híbridos no convencionales (HNC), los cuales se definen como híbridos que por lo menos uno de sus progenitores no es una línea endogámica [32]. En este caso los HNC son la cruza de material nativo con la línea endogámica, que permite incrementar el rendimiento y mejorar las características agronómicas de las cruzas, conservando la calidad de la variedad nativa, que en este caso se busca conservar la calidad para pozole de la raza elotes occidentales. Actualmente, se está conjuntando la información necesaria para liberar, registrar y obtener el título de obtentor de un HNC de maíz pozolero de grano rojo.

MAÍCES PALOMEROS O REVENTADORES (*POP CORN*)

Las razas más antiguas de maíz clasificadas como indígenas antiguas [33], presentan características de maíces reventadores o palomeros, no obstante, los maíces nativos representativos de estas razas son ancestros de los maíces palomeros comerciales actuales, tienen un volumen de expansión muy por debajo de los maíces comerciales introducidos de otras latitudes que han tenido un proceso de selección más intensivo hacia un mayor volumen de expansión. Por lo anterior, la mayor parte del maíz palomero consumido en México es importado.

Por lo tanto, la investigación está enfocada, por un lado, a reducir las importaciones, y por otro, a que los maíces palomeros constituyan una oportunidad para que los productores maiceros de México puedan incrementar sus ingresos por su valor agregado. El programa de Maíz del INIFAP del Bajío cuenta con germoplasma adaptado de maíces palomeros, con los que se pretende generar maíces híbridos con buen potencial de rendimiento y buenas características agronómicas. Con el apoyo del Laboratorio de Calidad de Maíz del INIFAP se está trabajando en la caracterización física y química tanto de los granos (dureza y tamaño; proteína, almidón y aceite); así como de las palomitas (volumen de expansión y tipo de roseta; azucares, proteína y fibra dietética). Actualmente, se está conjuntando la información necesaria para liberar, registrar y obtener título de obtentor de un nuevo híbrido trilineal de maíz palomero, adaptado a las regiones subtropicales.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489

MAÍCES DE CALIDAD FORRAJERA

Cada día el maíz con calidad forrajera constituye una alternativa para la producción de carne, leche y todos sus derivados, contribuyendo a una producción pecuaria más eficiente, e incluso más sustentable ya que el maíz forrajero requiere una menor cantidad de riego que la alfalfa. Algunas características que determinan la calidad forrajera del maíz son: alto rendimiento de materia seca, (más de 19 ton ha^{-1}); alto porcentaje de mazorca (más de 45 %); alta digestibilidad (mayor de 73 %); baja concentración de fibra detergente neutra (menos de 55%); fibra detergente acida (de 28 a 32%); y alta concentración de energía neta de lactancia (más de 1.4 Mcal/kg) [34]. Entre los parámetros de calidad de un maíz forrajero se destacan: la calidad de tallo y hojas, el contenido de fibras y proteína, así como la digestibilidad; atributos que se incorporan en los híbridos forrajeros que se liberan el programa de Maíz del INIFAP [35]. Tal es el caso de dos poblaciones de maíz integradas con germoplasma que fue identificado con características forrajeras en proyectos anteriores. De estas dos poblaciones forrajeras, fueron derivadas Líneas Doble Haploides (LDH), las cuales con la metodología desarrollada por Silva-Venancio y otros [7], se evaluarán las líneas *per se*, los cruzamientos de prueba, y las nuevas combinaciones entre las LDH que resultaron agronómicamente superiores y con mejor respuesta heterótica que permitan la identificación de nuevos híbridos de alto potencial de rendimiento y calidad forrajera.

MAÍCES RESISTENTES A FUSARIUM Y A LA CONTAMINACIÓN CON AFLATOXINAS

Actualmente, a nivel mundial se ha observado un incremento de los riesgos de producción del maíz (*Zea mays L.*) causados por el cambio climático y su inestabilidad, que implica temperaturas extremas, precipitación errática, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, entre otros. Estos factores alteran la cantidad, reproducción, diseminación, ciclos biológicos y sobrevivencia de las poblaciones de plagas, cuya alta incidencia afecta severamente la producción del cultivo. También se han incrementado problemas patológicos causados por enfermedades fungosas principalmente *Fusarium* y *Aspergillus* que se manifiestan a través de pudriciones de mazorca y tallo, que afectan el cultivo, y el grano de maíz tanto en el campo como en almacenamiento. Además del impacto en la producción y calidad del grano, estas enfermedades causadas por hongos producen sustancias conocidas como micotoxinas. El incremento de la presencia de *Fusarium* y *A. Flavus* en el cultivo de maíz, tendrá un impacto en la producción y calidad de grano, poniendo en riesgo la salud de los consumidores por su exposición a las micotoxinas. Con base en lo anterior, a través del mejoramiento genético, se pretende desarrollar materiales genéticos de maíz resistentes a *Fusarium* y *A. Flavus* para disminuir la contaminación y diseminación de micotoxinas.

De manera específica la presencia de *Fusarium* se ha incrementado en diversas regiones productoras de maíz en México, con repercusiones considerables en la producción, y con riesgos importantes en la salud a través de las fumonisinas. En el programa de Maíz del INIFAP en el Bajío, se desarrollaron dos poblaciones de maíz, formadas a partir de germoplasma identificado con características resistentes a fusarium, a partir de información obtenida en evaluaciones previas donde se

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489

identificaron materiales que presentaban resistencia a la presencia de *Fusarium* en el tallo. De estas dos poblaciones resistentes, fueron derivadas Líneas Doble Haploides (LDH), las cuales con la metodología desarrollada por Silva-Venancio y otros [7], evaluarán las líneas, los cruzamientos de prueba, y las nuevas combinaciones entre las LDH que resultaron agronómicamente superiores y con mejor respuesta heterótica, que permitan la identificación de nuevos híbridos con resistencia a Fusarium y con alto potencial de rendimiento.

En el caso de *A. flavus*, además de la presencia de mazorcas podridas, este hongo produce compuestos altamente carcinogénicos llamados Aflatoxinas (AF) que constituye un problema muy crítico para la salud humana y pecuaria. Asimismo, causa pérdidas de cosecha importantes ya que el grano contaminado tiene que ser destruido [36, 37]. A lo largo de 15 años de investigación interdisciplinaria, se identificaron materiales que después de su inoculación en laboratorio, presentaron resistencia y susceptibilidad a la contaminación con AF. Sin embargo, dado que los maíces con resistencia a AF, presentaban un mal desempeño agronómico y bajo rendimiento, se inició un proceso de cruzamientos de los materiales resistentes por líneas élite del Programa de Maíz del INIFAP, buscando, a través del método genealógico, generar nuevas líneas resistentes y altamente productivas. Este grupo de líneas recicladas serán la base para la generación de híbridos resistentes a la contaminación por aflatoxinas [38]. Con este germoplasma desarrollado por el Programa de Maíz del INIFAP en el Bajío, está en proceso la formación y evaluación de nuevos híbridos de alto potencial de rendimiento y que presenten resistencia a la contaminación por aflatoxinas.

CONCLUSIONES

Con base en las líneas de investigación presentadas, donde se describen las fuentes de germoplasma generadas, así como algunos desarrollos tecnológicos obtenidos a la fecha, es posible decir que estamos al frente de grandes oportunidades y retos en la investigación con carácter interdisciplinario del cultivo maíz en Latinoamérica. Mismas que conduzcan a innovar el desarrollo y utilización de materiales genéticos, con los que se podrá, por un lado, seleccionar maíces diferenciados, bio-fortificados, que aporten mayor valor agregado y que permitan desarrollar componentes bio-activos y alimentos funcionales, y por el otro, hacer frente a riegos inminentes de producción. Desafortunadamente, aunque que se cuenta con el material genético y la capacidad científica, en la actualidad escasean las fuentes financieras que respalden la continuidad de estos proyectos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto Tecnologías de frontera para impulsar la producción sostenible de maíz en las Américas -Tech Maíz– financiado por el Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo – CYTED- y a la Red Latinoamericana del Maíz por gestionar la elaboración y publicación de este artículo.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interes en el presente trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Ricardo Ernesto Preciado-Ortiz, elaboró el manuscrito y desarrolló en campo el material genético descrito en el documento; María Gricelda Vázquez-Carrillo, elaboró el manuscrito y asistió en la selección en laboratorio del material genético descrito en el documento.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2489

REFERENCIAS

[1] Panorama Agropecuario (2020). SIAP-SADER. Recuperado de: https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2020/11/Atlas-Agroalimentario-2020.pdf

[2] Staller, J. E., Tykot, R. H. y Benz F., B. (2006). *Histories of Maize: multidisciplinary approaches to the Prehistory, linguistics, biogeography, domestication, and evolution of maize*. Academic Press.

[3] Muñoz O. A., A. Santacruz V., P. A. López, H. López S., A. Gil M., J. Legaria S., J. D. Guerrero R., H. Hernández S, E Ortiz T, J I Olvera H, J Romero P, N Gómez M, G Pérez G, A. Mejía C. y R. Gabino G. (2003). Diversidad de ambientes de tipos de mazorca y de otros atributos a nivel de nicho. En Muñoz O. A. Ed. Centli Maíz. Colegio de Posgraduados, Texcoco, Mex. pp 132-143.

[4] Serna S. S. O., García L. y Gutiérrez U. (2011). Perfil fitoquímico y propiedades nutracéuticas de maíces pigmentados y sus tortillas. En: Preciado-Ortiz R. E. y S. Montes H. (Eds.) Amplitud, mejoramiento, usos y riesgos de la diversidad genética de maíz en México. Sociedad Mexicana de Fitogenética A.C. pp. 75-95.

[5] Preciado-Ortiz, R. E., S. García-Lara, S., Ortiz-Islas, A., Ortega-Corona y S. O. Serna-Saldivar (2013) Response of recurrent selection on yield, kernel oil content and fatty acid composition of subtropical maize populations. *Field Crops Research* 142:27-35. doi: https:// doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.019

[6] Ortega-Corona A., Picón-Rico, R., Preciado-Ortiz, R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Guerrero-Herrera, M. J., García-Lara. S. y Serna-Saldivar, S. O. (2015). Selection response for oil content and agronomic performance in four subtropical maize populations. Maydica 60:1-8. Available at: https://journals-crea.4science.it/index.php/maydica/article/view/1279

[7] Silva-Venancio, S., Preciado-Ortiz, R.E., Covarrubias-Prieto, J., Ortiz-Islas, S., Serna-Saldivar, S.O., García- Lara, S., Terrón-Ibarra, A.D. y Palacios Rojas, N. (2019). Identification of superior doubled haploid maize (*Zea mays*) inbred lines derived from high oil content subtropical populations. *Maydica* 64 M7- 1-11, 2019. Available at: <https://journals-crea.4science.it/index.php/maydica/article/view/1879

[8] Picón-Rico R., Preciado-Ortiz, R. E., Cervantes-Ortiz, F., Covarrubias-Prieto, J. y Terrón-Ibarra, A. (2018). Efectos heteróticos en líneas doble haploides de maíz de grano blanco y alto contenido de aceite. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41(2):177-186. https://doi.org/10.35196/rfm.2018.2.177-186.

[9] Picón-Rico R., Preciado-Ortiz, R. E., Cervantes-Ortiz, F., Covarrubias-Prieto, J. y Terrón-Ibarra, A. (2018). Efectos genéticos en líneas doble haploides de maíz de grano amarillo y alto contenido de aceite. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41(3):301-310. https://doi.org/10.35196/rfm.2018.3.301-310.

[10] Preciado-Ortiz R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, Ma. G., Gómez-Montiel, N. O, Briones-Reyes, D. y Peña-Ramos, A. (2019). H-388 O, Híbrido trilineal de maíz de grano blanco oleoso para el subtrópico de México. Revista Fitotecnia Mexicana 42(3):309-311. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000300309&lng=es&nrm=iso

[11] Preciado-Ortiz R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, Ma. G., Gómez-Montiel, N. O, Briones-Reyes, D. y Peña-Ramos, A.(2019). H-389 O, Híbrido trilineal de maíz de grano blanco oleoso adaptado a regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(2):183-185. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000200183&lng=es&nrm=iso

[12] Preciado-Ortiz R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, Ma. G., Gómez-Montiel, N. O y Briones-Reyes, D. (2019). H-327 AO, Híbrido trilineal de maíz oleoso de grano amarillo para regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(3):313-315. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000300313&lng=es&nrm=iso

[13] Vázquez-Carrillo, M. G., R. E. Preciado-Ortiz, D. Santiago-Ramos, N. Palacios-Rojas, A. Terrón-Ibarra y A. Hernández-Calette (2018). Estabilidad del rendimiento y calidad de grano y tortilla de nuevos híbridos de maíz con valor agregado para el subtrópico de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41(4-A):509-518. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802018000500509&lng=es&nrm=iso

[14] Ortiz-Islas, S., García-Lara, S., Preciado-Ortiz, R. E. y Serna-Saldívar, S. O. (2018). Fatty acid composition and proximate analysis of improved high-oil corn double haploid hybrids adapted to subtropical areas. *Cereal Chemistry* 1-11. doi: https://doi.org/10.1002/cche.10109

[15] Preciado-Ortiz, R. E., Vázquez-Carrillo, Ma. G., Figueroa-Cárdenas, J. D., Guzmán-Maldonado, S. H., Santiago-Ramos, D. y Topete-Betancourt, A. (2018). Fatty acids and starch properties of high-oil maize hybrids during nixtamalization and tortilla-making process. *Journal of Cereal Science* 83:171–179. doi: http://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.08.015

[16] Luzardo-Ocampo, I., Campos-Vega, R., Gaytán-Martínez, M., Preciado-Ortiz, R. E., Mendoza, S. y Loarca-Piña, G. (2017). Bioaccessibility and antioxidant activity of free phenolic compounds and oligosaccharides from corn (Zea mays L.) and common bean (Phaseolus vulgaris L.) chips during in vitro gastrointestinal digestion and simulated colonic fermentation. *Food Research International* 100(2017):304-311. doi: http://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.018

[17] Arámbula, V. G., Barrón, A. L., González, H. J., Moreno, M. E. y Luna, B., G. (2001). Efecto del tiempo de cocimiento y reposo del grano de maíz (Zea mays L) nixtamalizado, sobre las características fisicoquímicas, reológicas, estructurales del grano, masa y tortillas de maíz. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 51:187-194. Disponible en: <http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222001000200011&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0004-0622.

[18] Vázquez-Carrillo M. G., Santiago-Ramos, D., Gaytan-Martinez, M., Morales-Sánchez, E. y Guerrero-Herrera, M. J. (2015). High oil content maize: Physical, thermal and rheological properties of grain, masa, and tortillas. *LWT-Food Science and Technology* 60(1):156-161. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.07.043

[19] Ordaz-Ortiz, J. J. y Vázquez-Carrillo, M. G. (1997). Vida de anaquel y evaluación sensorial en tortillas de maíz elaboradas con conservadores y mejoradores. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 47(4):372-376. Disponible en: https://www.alanrevista.org/ediciones/1997/4/art-13/

[20] Preciado O., R. E. y Terrón Ibarra, A. D. (2001). Comportamiento y adaptación de dos nuevos híbridos trilineales de maíz, H-316 y H-317, para El Bajío. *Revista Fitotecnia Mexicana* 24(2):235-239. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61024214

[21] Pixley K, Palacios-Rojas, N., Babu, R., Mutale, R., Surles, R. y Simpungwe, E. (2013). Bio-fortification of maize with pro-vitamin A carotenoids in: Carotenoids in Human Health. Ed. *S. A. Tanumihardo (New York: Springer Science + Business Media)*, 271-292. doi: http://doi.org/10.1007/978-1-62703-2013-2-17

[22] Preciado-Ortiz R. E., Terrón-Ibarra, A. D., Vázquez-Carrillo, Ma. G. y Gómez-Montiel, N. O. (2019). H 387 A, Híbrido trilineal de maíz de grano amarillo adaptado a regiones subtropicales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 42(1):67-69. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000100067&lng=es&nrm=iso

[23] Preciado-Ortiz R., Guerrero, R., Ortega, A., Terrón, A., Crossa, F., Cordova, H., Reyes, C., Aguilar, G., Tut, C., Gómez, N. y Cervantes, E. (2006). Identification of superior quality protein maize hybrids for different mega-environments using the biplot methodology. *Maydica* 51:451-460. Disponible en: https://repository.cimmyt.org/handle/10883/3038?locale-attribute=en

[24] Melesio C., J. L., Preciado-Ortiz, R. E., Terrón I., A. D., Vázquez C., Ma. G., Herrera M., P., Amaya G., C. A. y Serna S., S. O. (2008). Potencial productivo, propiedades físicas y valor nutrimental de híbridos de maíz de alta calidad proteínica. *Agricultura Técnica en México* 34 (2):225-233. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172008000200009&lng=es&nrm=iso

[25] Serna-Saldívar S.O, Amaya, C. A., Herrera M., G. P., Melesio C., J. L., Preciado-Ortiz, R. E., Terrón I., A. D. y Vázquez-Carrillo, G. (2008). Evaluation of the lime-cooking and tortilla making properties of quality protein maize hybrids grown in Mexico. *Plant Foods Hum Nutr* 63:119-125. doi: https://doi.org/10.1007/s11130-008-0080-1

[26] Vázquez-Carrillo M. G., Mejía-Andrade, H., Tut-Couoch, C. y Gómez-Montiel, N. (2012). Características de granos y tortillas de maíces de alta calidad proteínica desarrollados para los Valles Altos centrales de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35 (1):23-31. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802012000100005&lng=es&nrm=iso

[27] Ortiz-Martínez, M., E. González de Mejía, S. García-Lara, O., Aguilar, L. M. López-Castillo, & J. T. Otero-Pappatheodorou (2017) Antiproliferative effect of peptide fractions isolated from a quality protein maize, a white hybrid maize, and their derived peptides on hepatocarcinoma human HepG2 Cells. J. Funct. *Foods* 34, 36-48. doi: http://doi.org/10.1016/j.jprot.2014.03.044

[28] Díaz-Gómez J.L., F. Castorena-Torres., R.E. Preciado-Ortiz, & S. García-Lara (2017) Anti-Cancer Activity of Maize Bioactive Peptides. Front. Chem. 5:44. doi: http://doi.org/10.3389/fchem.2017.00044

[29] Gómez-Favela, M. A., Reyes-Moreno, C., Milán-Carrillo, J., Partida-Preciado, R. A., Espinoza-Moreno, R. J., Preciado-Ortiz, R. y Gutiérrez-Dorado, R. (2021). Gluten-free healthy snack with high nutritional and nutraceutical value elaborated from a mixture of extruded underutilized grains (quality protein maize/tepary bean). *Acta Universitaria* 31, e3024. doi: http://doi.org/10.15174.au.2021.3024

[30] Marrufo-Díaz M. L., Vázquez-Carrillo, M. G., Santiago-Ramos, D., Ybarra-Moncada, M. C. y Mejía-Andrade, H. (2021). Physicochemical and sensory properties of 'corn on the cob' (elotes) from quality protein maize (QPM) hybrids as influenced by harvest stage and cold storage time. *Journal of Cereal Science* 102. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103348

[31] Urias-Peraldi, M., Gutiérrez-Uribe, J. A., Preciado-Ortiz, R. E., Cruz-Morales, A. S., Serna-Saldivar, S. O. y García-Lara, S. (2013). Nutraceutical profiles of improved blue maize (Zea mays) hybrids for subtropical regions. *Field Crops Research* 141 (2013) 69-76. doi: http://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.008

[32] Paliwal, R.L. (1986). CIMMYT's expanded maize improvement program. In: Proceedings of the Second Asian Regional Maize Workshop. Wedderburn, R. N., and C. De León, (eds.). CIMMYT. pp. 125-140.

[33] Wellhausen, E. J., Roberts, L. M., Hernández X., E. y Mangesdorf, P. C. (1951). Razas de Maíz en México: Su Origen, Características y Distribución. Folleto Técnico No. 5. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Oficina de Estudios Especiales. p. 237. Disponible en: https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/50301000/Races_of_Maize/Raza_Mexico_0_Book.pdf

[34] Núñez, H.G., Peña R., González C., F. y Faz C., R. (2006). Características de híbridos de maíz de alta calidad nutricional. In: Maíz forrajero de alto rendimiento y calidad nutricional. Núñez H., G. (comp) Libro científico Num. 13 INIFAP-CIRNOC-CELALA pp. 45-97.

[35] Peña R. A., González C., F., Núñez H., G., Tovar G., Ma. R., Preciado O., R. E., Terrón I., A., Gómez M., N. y Ortega C., A. (2006). Estabilidad del rendimiento y calidad forrajera de híbridos de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29 (Num. Esp. 2): 109-114. Disponible en: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61009819

[36] Arrúa A., Moreno, E., Quezada, M., Moreno, J. y Vázquez, A. (2012). Aflatoxygenic aspergillus: Current taxonomic approach. *Mexican Journal of Agricultural Sciences* 3:1047-1052. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000500016&lng=es&nrm=iso

[37] Martínez, P. H., Hernández, D. S., Reyes M., C. y Vázquez, C. (2013). El Género Aspergillus y sus Micotoxinas en Maíz en México: Problemática y Perspectivas. *Revista Mexicana de Fitopatología* 31 (2):126-146. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092013000200005&lng=es&nrm=iso

[38] Sánchez-Isordia N.D, Preciado-Ortiz, R. E., Covarrubias-Prieto, J., Terrón, A. D., Reyes, C. A., Gómez, N. O., García, M. A., Ramírez, J. G. y Moreno-Martínez, E. (2020) Yield Potential and Aflatoxin Resistance in Subtropical Maize Hybrids. *Environmental Analysis & Ecology Studies 7*(1):682-705. doi: http://doi.org/10.31031/EAES.2020.07.000654